Partie 2
Caractéristiques Générales des Antennes

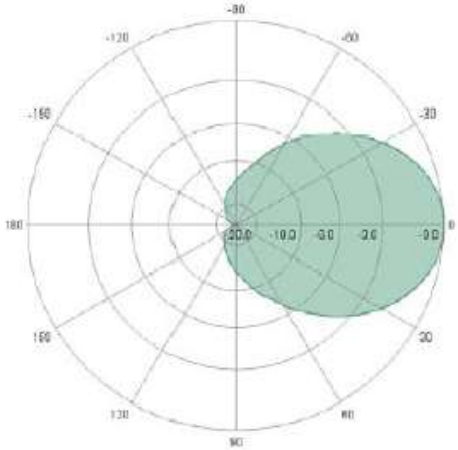
Points clés

On a vu que la théorie des antennes est basée sur le rayonnement produit par des sources (charges, courants) à la surface d'un conducteur.
Quand on veut décrire le fonctionnement d'une antenne particulière, certaines caractéristiques fondamentales, communes à tous les types d'antennes, sont données :

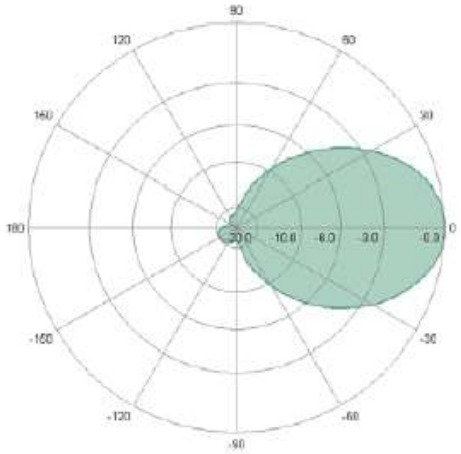
- Impédance d'entrée
- Diagramme de rayonnement
- Gain
- Polarisation

Exemple de fiche technique

Antenne pour point d'accès Wifi



horizontal



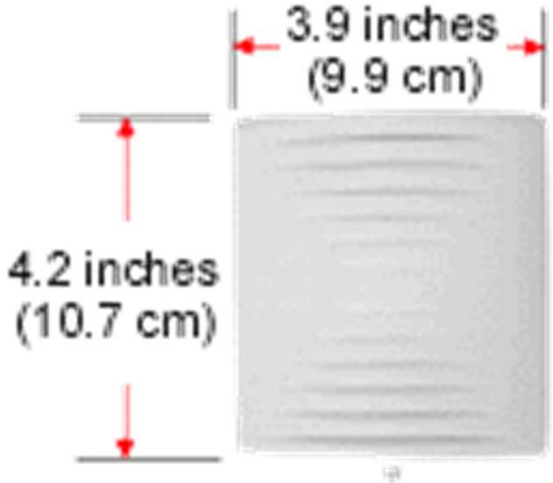
vertical

Electrical Properties	
Frequency range	2300 - 2800 MHz
Impedance	50 Ω
VSWR	1.5
Polarization	linear, vertical
Gain	7.5 dBi
3 dB beamwidth horizontal	75°
3 dB beamwidth vertical	70°
Downtilt	0°
Front to back ratio	20 dB
Max. power	75 W (CW) at 25°C

Mechanical Properties	
Dimensions	101 x 80 x 20 mm (3.97" x 3.15" x 0.79")
Weight	0.13 kg (0.29 lbs.)
Radome material	ASA
Radome color	RAL 7035 (light grey)
Operating temperature range	- 40°C to + 80°C
Storage temperature range	- 40°C to + 80°C
Windload	15 N at 160km/h (100mph)

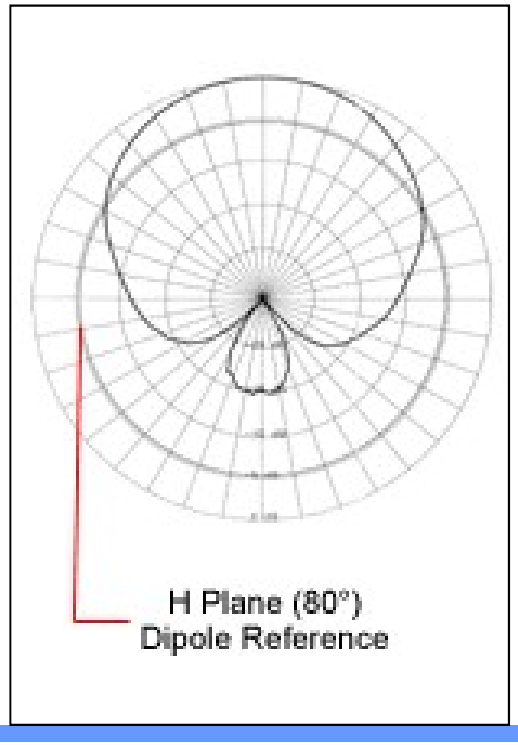
Exemple de fiche technique (2)

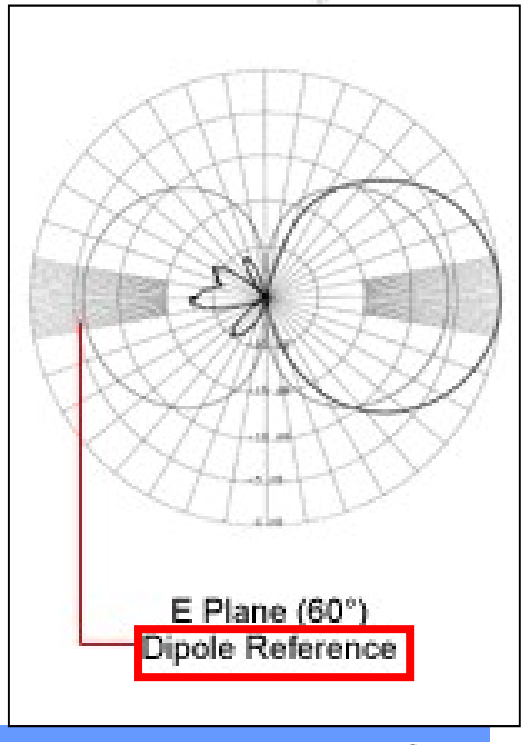
Antenne pour point d'accès Wifi



Specifications

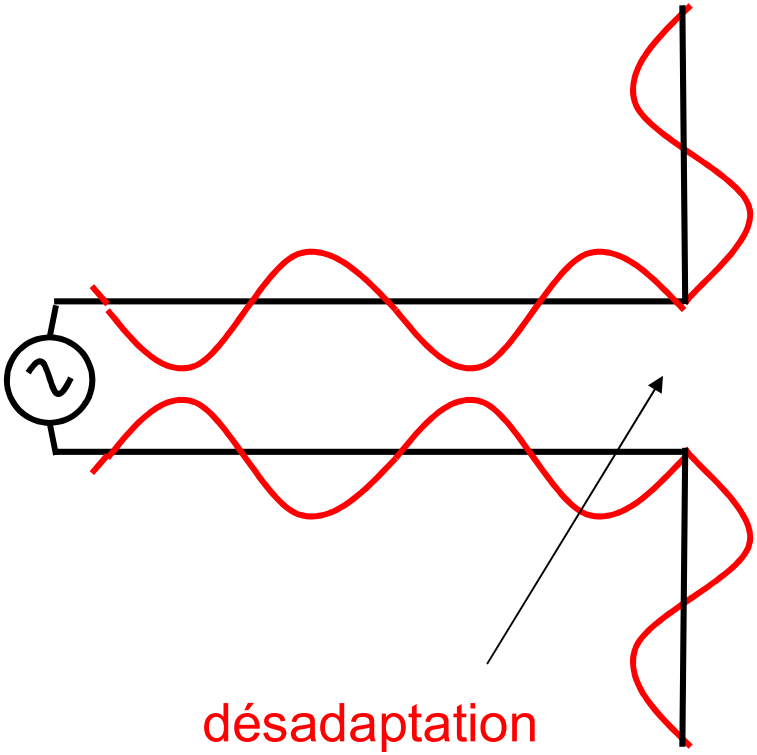
Electrical	
Gain	8.0 dBi
Frequency Range	2300-2500 MHz
VSWR	1.5:1
Power	10 watts
Impedance	50 ohms
Polarization	Vertical
Front to Back Ratio	>25dB
E-plane Beamwidth	60°+-5°
H-plane Beamwidth	80°+-5°
Mechanical	
Depth	1.6 inches (4.1 cm)
Radiator Material	Brass
Reflector Material	Brass
Mounting	Integrated
Windload(fatal)	208kph
Weight	0.145 kg
Cable	not supplied
Connector	SMA female

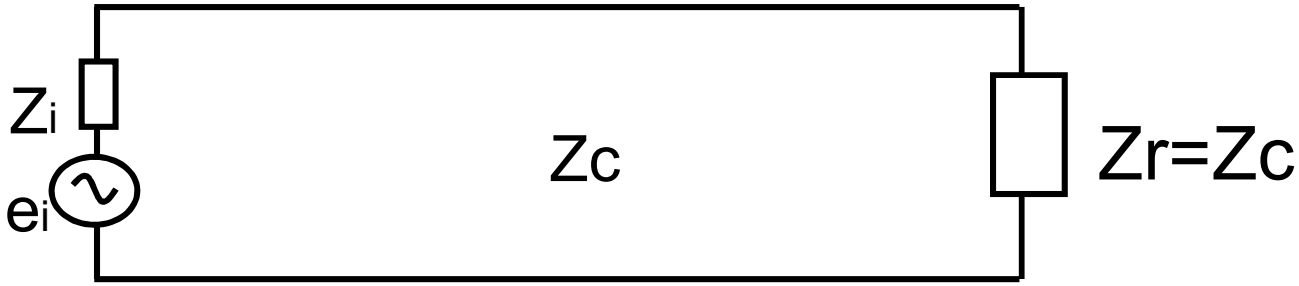




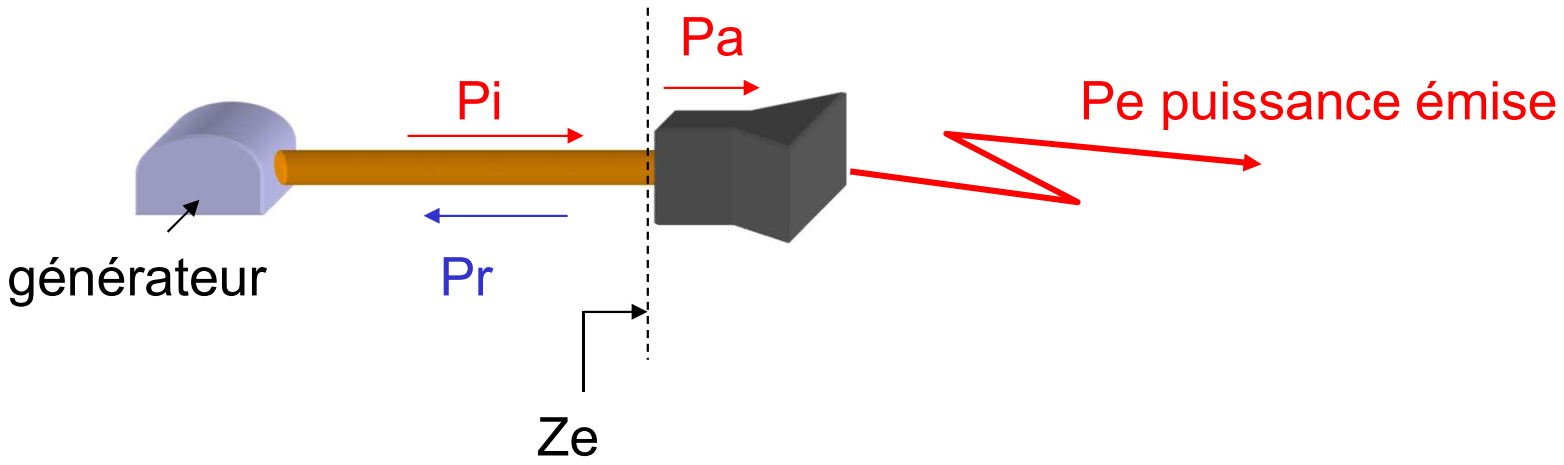
L'impédance d'entrée

Si on reprend l'exemple de la ligne ouverte, l'écartement des brins provoque un changement de l'impédance.
L'onde est alors réfléchie à l'interface entre la ligne et l'antenne, d'où perte importante d'énergie.
Le but est alors de revenir à un système adapté.





L'antenne en tant que circuit



L'antenne étant un système résonant (onde stationnaire), il faut faire en sorte que l'impédance qu'elle ramène face à la ligne (son impédance d'entrée) soit adaptée à celle-ci.

La ligne est alors en onde progressive, toute la puissance est transmise à l'antenne.

L'antenne sert alors de transformateur d'impédance entre l'espace libre et la ligne de transmission.

La puissance rayonnée ne dépend que de la puissance acceptée et des pertes de l'antenne.

Coefficient de réflexion

On définit la qualité d'adaptation d'une antenne soit en donnant son impédance caractéristique (souvent 50 ohms), soit en donnant son niveau de coefficient de réflexion.

$$Ze = R + jX$$

coefficient de réflexion en puissance : $|S_{11}|^2 = \frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pi}}$

$|S_{11}|$ est le coefficient de réflexion en tension

Impédance déduite d'une mesure de réflexion :

$$Ze = Zc.\frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}$$

Expression en décibels

On trouve la plupart du temps les valeurs exprimées en décibels :

$$\left|S_{11}\right|_{dB} = 20\log\left|S_{11}\right| \text{ return loss}$$

On parle aussi beaucoup en terme de VSWR :

$$VSWR = \frac{1+\left|S_{11}\right|}{1-\left|S_{11}\right|}$$

souvent exprimé sous la forme n:1

Conversions

VSWR	Return Loss (dB	Reflected Power (%)	Transmiss. Loss (dB)	VSWR	Return Loss (dB)	Reflected Power (%)	Transmiss. Loss (dB)
1.00	oo	0.000	0.000	1.38	15.9	2.55	0.112
1.01	46.1	0.005	0.0002	1.39	15.7	2.67	0.118
1.02	40.1	0.010	0.0005	1.40	15.55	2.78	0.122
1.03	36.6	0.022	0.0011	1.41	15.38	2.90	0.126
1.04	34.1	0.040	0.0018	1.42	15.2	3.03	0.132
1.05	32.3	0.060	0.0028	1.43	15.03	3.14	0.137
1.06	30.7	0.082	0.0039	1.44	14.88	3.28	0.142
1.07	29.4	0.116	0.0051	1.45	14.7	3.38	0.147
1.08	28.3	0.144	0.0066	1.46	14.6	3.50	0.152
1.09	27.3	0.184	0.0083	1.47	14.45	3.62	0.157
1.10	26.4	0.228	0.0100	1.48	14.3	3.74	0.164
1.11	25.6	0.276	0.0118	1.49	14.16	3.87	0.172
1.12	24.9	0.324	0.0139	1.50	14.0	4.00	0.18
1.13	24.3	0.375	0.0160	1.55	13.3	4.8	0.21
1.14	23.7	0.426	0.0185	1.60	12.6	5.5	0.24
1.15	23.1	0.488	0.0205	1.65	12.2	6.2	0.27
1.16	22.6	0.550	0.0235	1.70	11.7	6.8	0.31

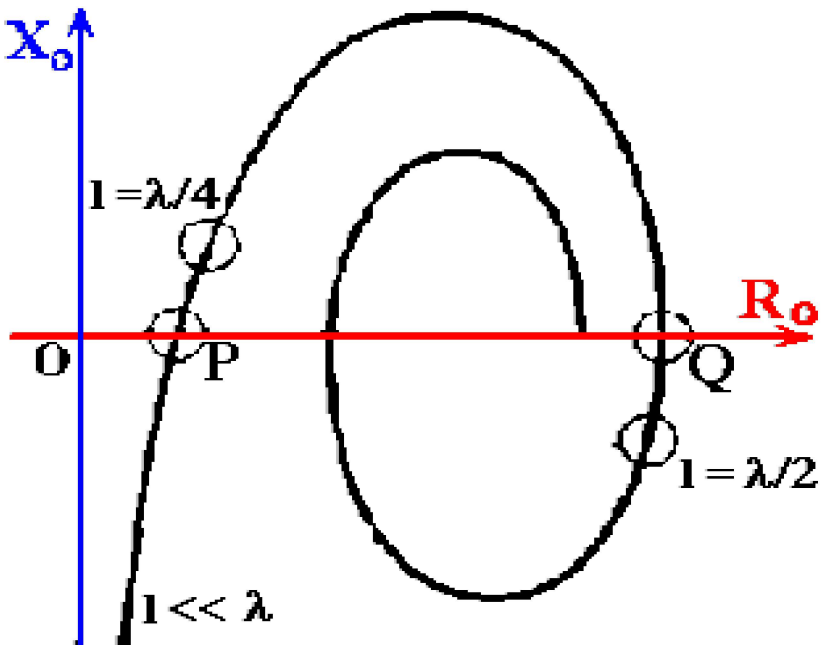
Résistance de rayonnement

$$Ze = R + jX$$

résistance de rayonnement et résistance de pertes

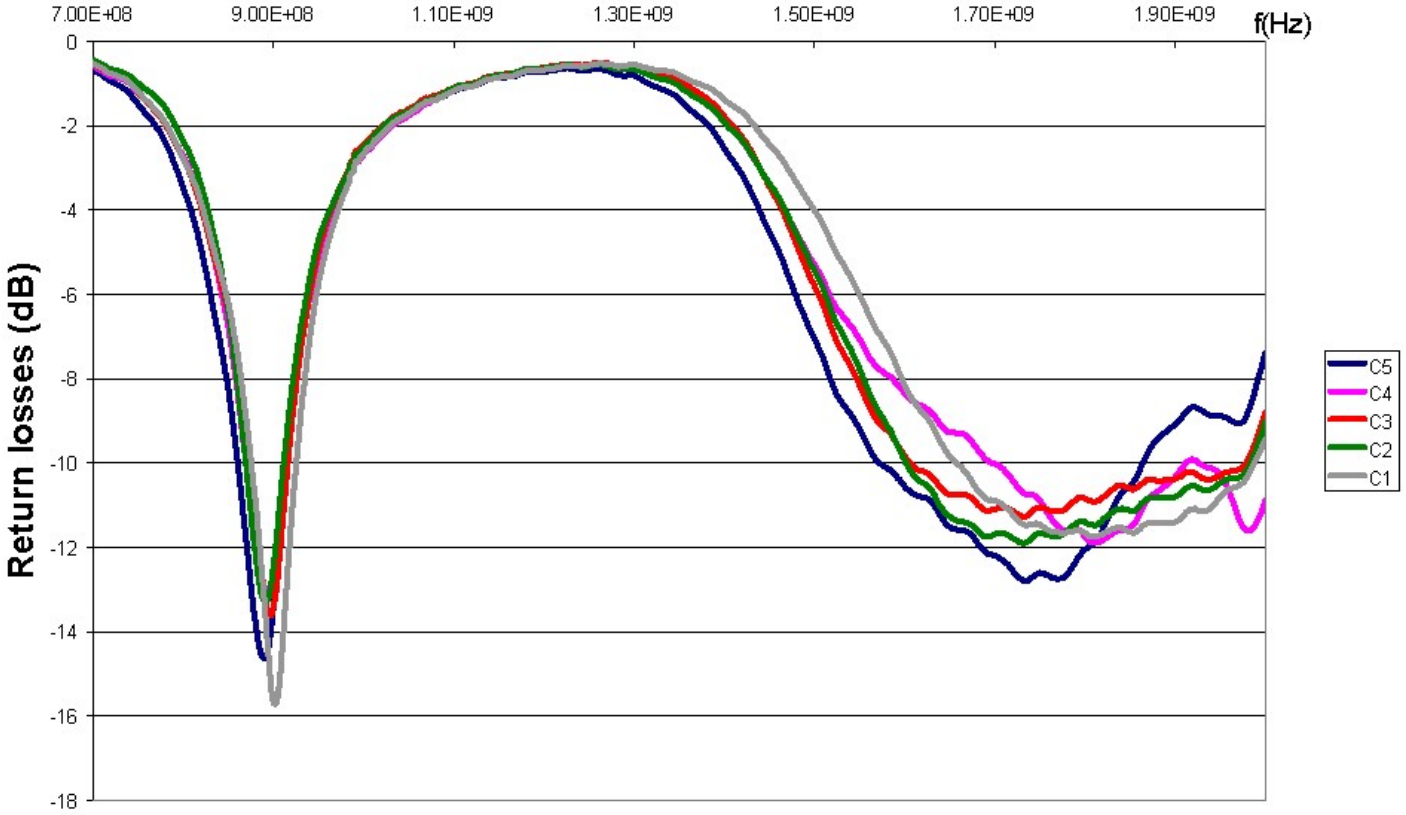
Pour des antennes métalliques, on peut négliger la résistance de pertes.

Dans une antenne parfaitement accordée, X=0



Bande passante

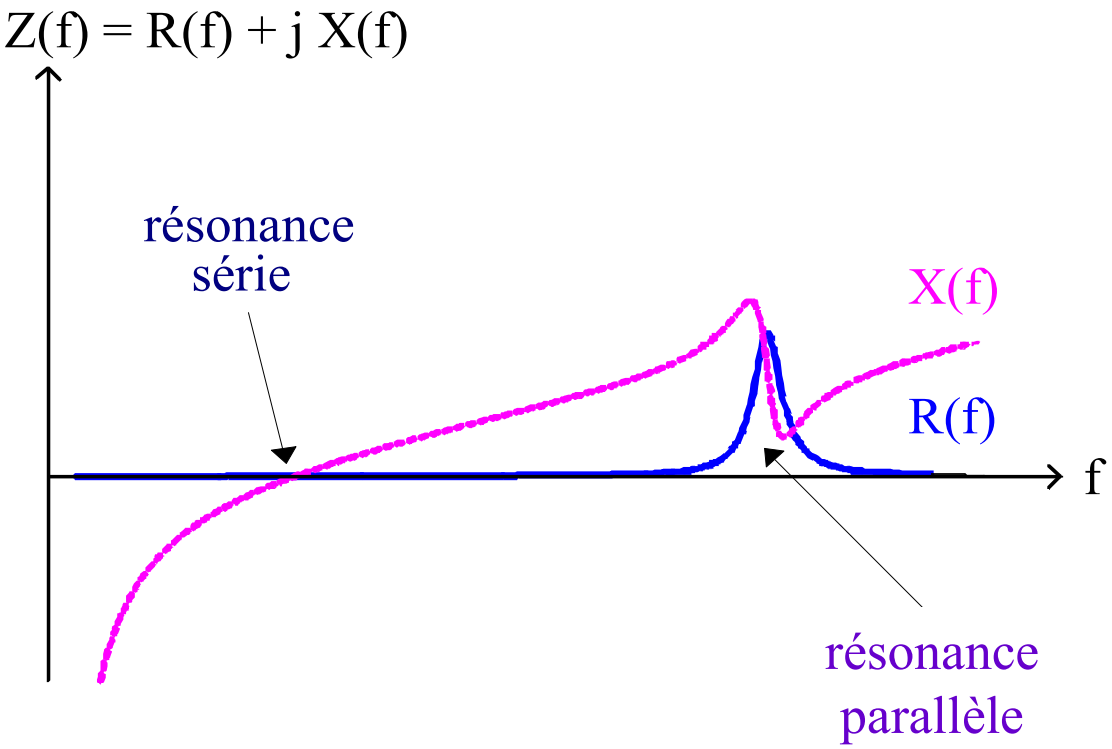
Il existe de nombreuses définitions de bandes passantes. La plus commune est la bande passante en adaptation où le coefficient de réflexion de l'antenne respecte un certain niveau.



Relation avec l'impédance

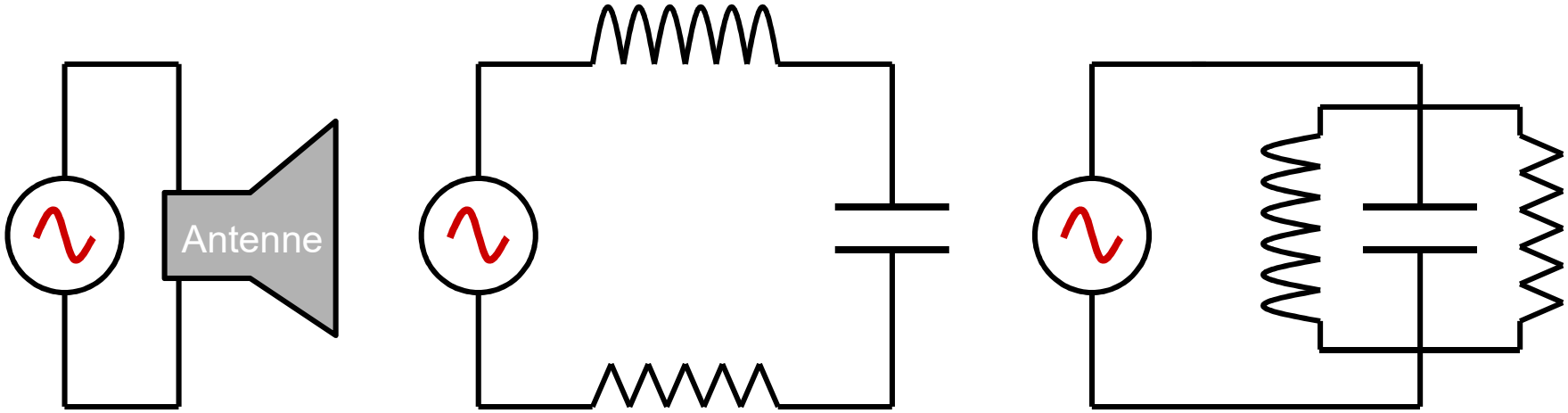
L'impédance complexe d'une antenne varie en fonction de la fréquence. Cela correspond aux variations de répartition des courants à sa surface.

On cherche à faire correspondre la fréquence de fonctionnement avec un point d'impédance purement réel proche de celle du système (50 ohms en général).



Résonances série ou parallèle

La géométrie de l'antenne et son mode d'alimentation influent sur cette impédance. On cherche généralement à se placer au plus près d'une résonance et à annuler la partie imaginaire.



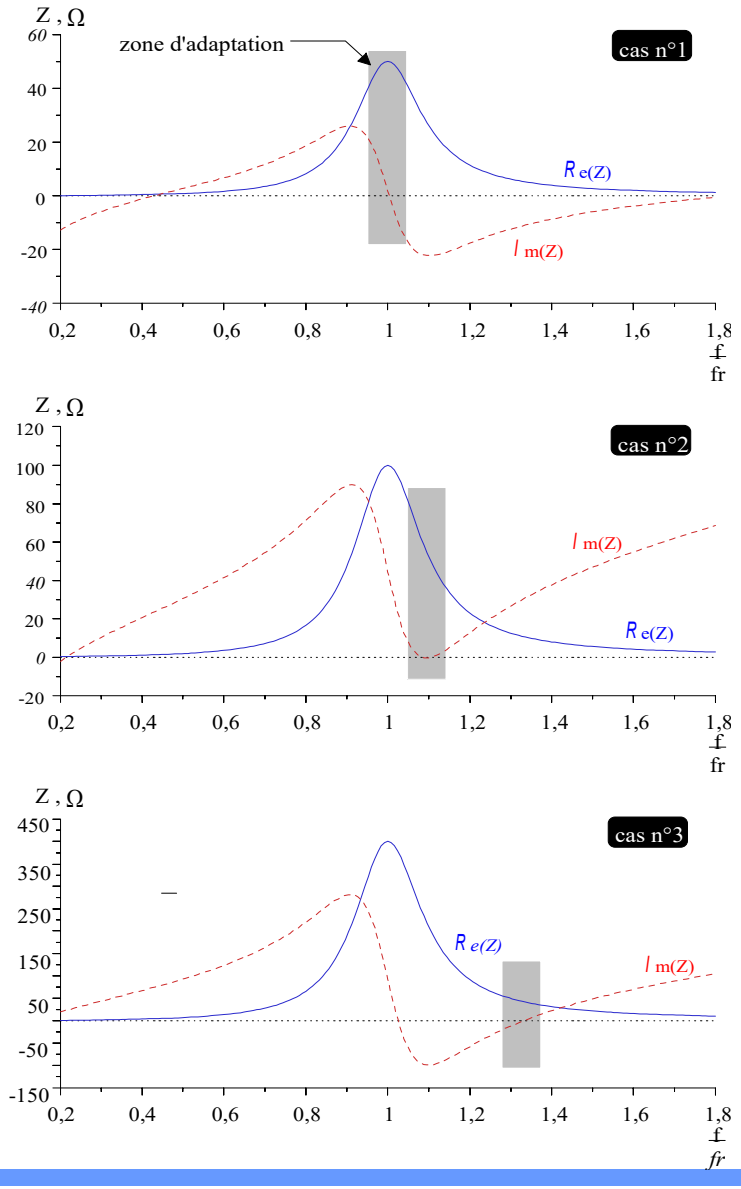
Résonance série

Max de courant au niveau du générateur
Impédance faible

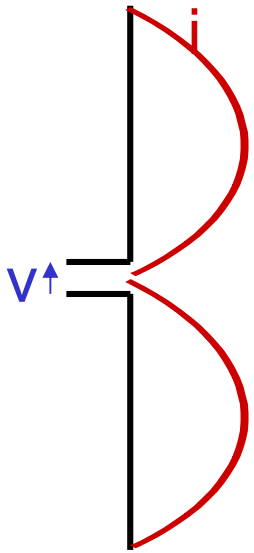
Résonance parallèle

Min de courant au niveau du générateur
Impédance élevée

Exemples de points d'adaptation



Exemple du dipôle



Le choix du point d'adaptation peut déterminer la bande passante.

Couplage mutuel

Deux antennes proches influent l'une sur l'autre par un couplage des champs EM.
Ce couplage doit être pris en compte car il modifie les caractéristiques des antennes (impédance et rayonnement).

↓

Limite rapide des modèles analytiques

↓

Modélisation électromagnétique

Caractéristiques de rayonnement

Pour rendre compte des performances de l'antenne d'un point de vue des champs rayonnés on utilise :

- la fonction caractéristique
- le diagramme de rayonnement
- la directivité
- le gain
- l'ouverture
- la surface équivalente

La fonction caractéristique

La fonction caractéristique permet de représenter les variations du niveau de champ rayonné en champ lointain en fonction de la direction considérée.

Cas du doublet :

$$E\ (\theta) = \frac{j}{2\lambda r}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot I \cdot dl \cdot \sin\theta \cdot e^{j(\omega t - \beta r)}$$

I : intensité maximale

$$\left|E\ (\theta)\right| = \frac{60\pi}{\lambda r} \cdot I \cdot dl \cdot \left|\sin\theta\right|$$

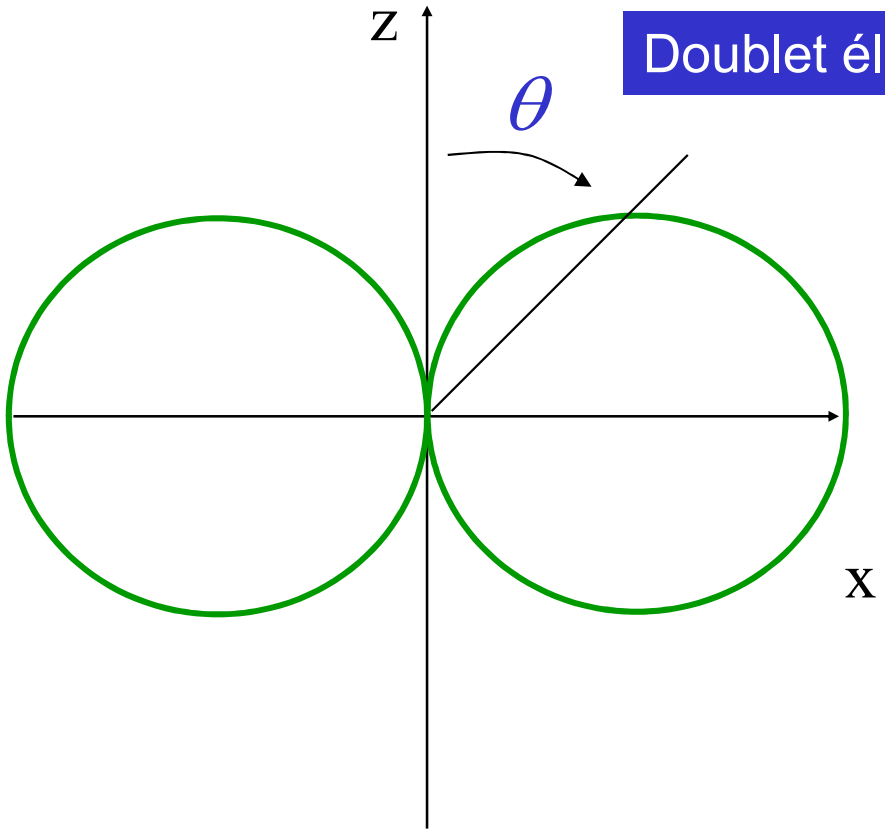
$$\left|E\ (\theta)\right| = \frac{60I}{r} \cdot \underbrace{\frac{\pi dl}{\lambda}\left|\sin\theta\right|}_{\left|F\ (\theta)\right|}$$

fonction caractéristique du doublet

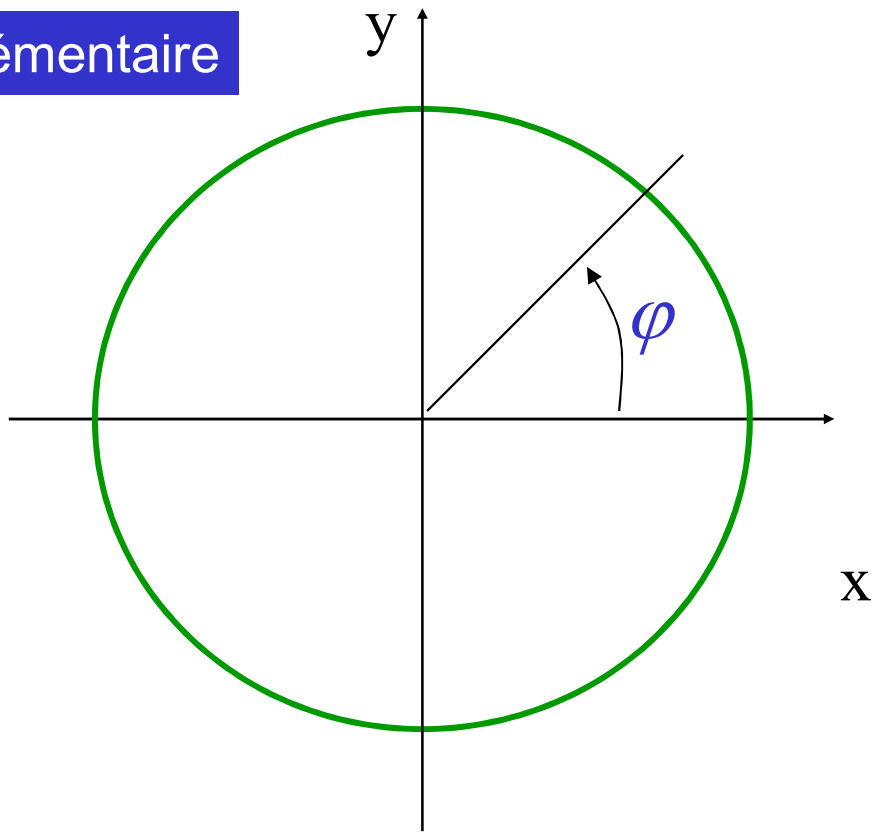
Diagramme de rayonnement

Définition générale : $$\left|F(\theta,\varphi)\right| = \frac{r}{60I}\cdot\left|E(\theta,\varphi)\right|$$

Doublet élémentaire



Plan vertical



Plan horizontal

Notion de puissance

La puissance totale rayonnée est égale au flux du vecteur de Poynting à travers une surface fermée entourant l'antenne.

$$P = \iint_{sphère} \vec{P}.d\vec{S}$$

En champ lointain, on trouve :

$$\boxed{\Delta P = \frac{|E|^2}{2\eta}}$$

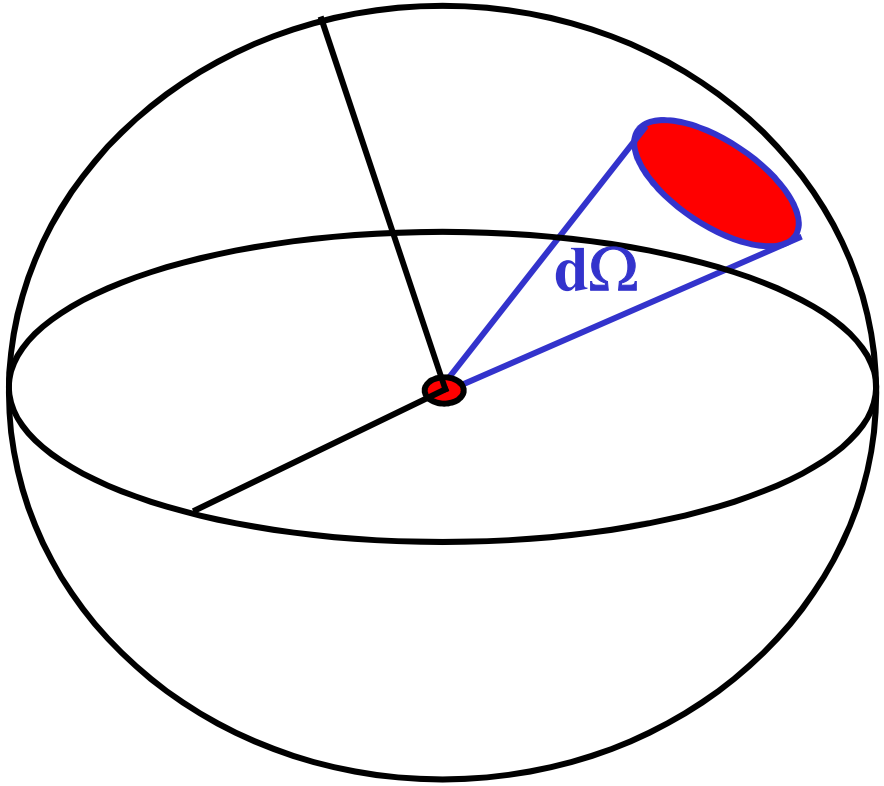
densité surfacique de puissance

Pour la représentation on utilise souvent une puissance normalisée :

$$\boxed{\Delta P_n(\theta,\varphi) = \frac{\Delta P(\theta,\varphi)}{\Delta P_{max}}}$$

Angle solide

La densité de puissance surfacique peut également s'exprimer en densité stérique, en fonction de l'angle solide



$$d\Omega = \frac{1}{r^2} dS = \sin\theta \, d\theta \, d\varphi$$

$$P_e = \frac{15}{\pi} I^2 \cdot \oiint_{\Omega} F^2(\theta,\varphi) \cdot d\Omega$$

$$P_e = \oiint_{\Omega} U(\theta,\varphi) \cdot d\Omega$$

$$U(\theta,\varphi) = \frac{15 I^2}{\pi} F^2(\theta,\varphi) \qquad Watt/stéradian$$

densité stérique de puissance ou intensité de rayonnement

Résistance de rayonnement

Quand on fait le lien entre la puissance rayonnée et la puissance dissipée par une charge, on peut déterminer la résistance de rayonnement à partir de la fonction caractéristique.

$$P_e = \frac{15}{\pi} I^2 \cdot \oiint_{\Omega} F^2(\theta,\varphi) \cdot d\Omega$$

$$\boxed{R_r = \frac{30}{\pi} \cdot \oiint_{\Omega} F^2(\theta,\varphi) \cdot d\Omega}$$

Directivité d'une antenne

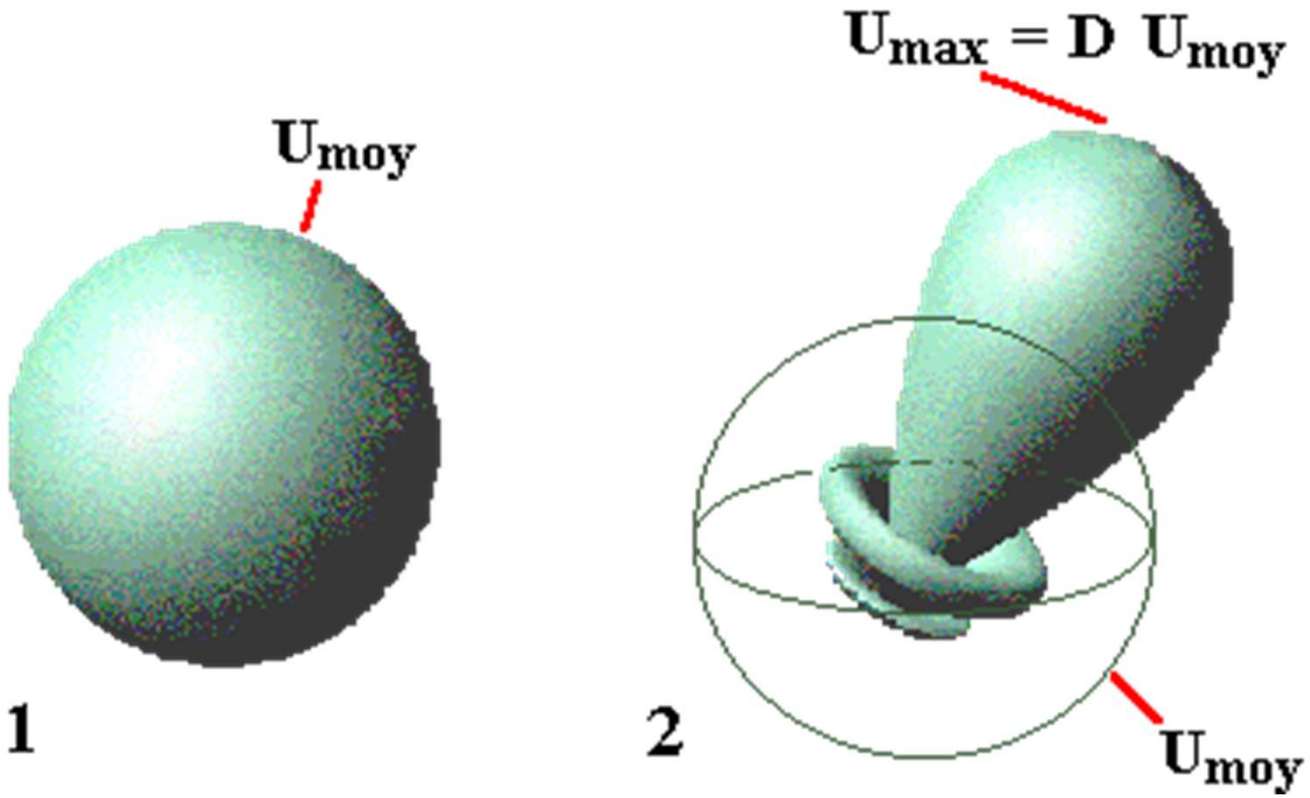
Soit Pe la puissance rayonnée totale, on dit que l'antenne est isotrope quand la densité stérique dans n'importe quelle direction donnée s'exprime :

$$U(\theta,\varphi)=\frac{P_e}{4\pi}$$

On appelle directivité le rapport entre la densité de puissance créée dans une direction donnée et la densité de puissance d'une antenne isotrope.

$$\boxed{D(\theta,\varphi)=\frac{U(\theta,\varphi)}{\frac{Pe}{4\pi}}}$$

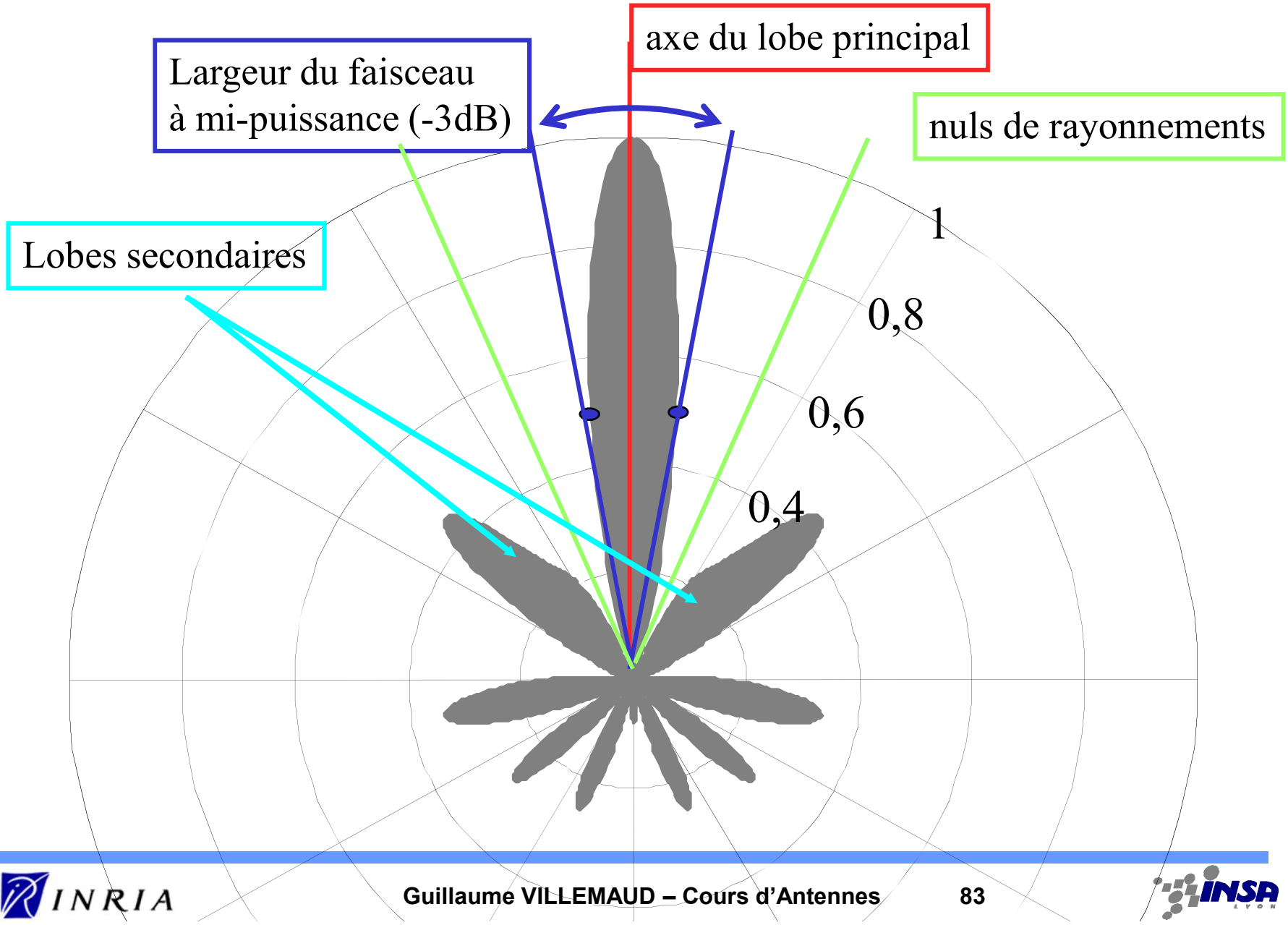
Signification de la directivité



$$D(\theta_0,\varphi_0)=\frac{F^2(\theta_0,\varphi_0)}{\frac{1}{4\pi}\int_\Omega F^2(\theta,\varphi)d\Omega}$$

Pour l'antenne isotrope, D=1 quelle que soit la direction

Ouverture à mi-puissance



Gain de l'antenne

Le gain est défini de la même manière que la directivité en tenant compte de la puissance fournie à l'antenne :

$$G(\theta,\varphi)=\frac{U(\theta,\varphi)}{\frac{P_f}{4\pi}}$$

Ce gain est parfois dénommé gain réalisé en opposition au gain intrinsèque ne prenant en compte que les pertes de l'antenne (sans les pertes d'adaptation).

$$G_{\text{intrinsèque}}=\frac{G_{réalisé}}{1-\left|S_{11}\right|^2}$$

S'il n'y a pas de pertes, le gain est égal à la directivité

$$G(\theta_0,\varphi_0)=4\pi\cdot\frac{F^2(\theta_0,\varphi_0)}{\oiint_\Omega F^2(\theta,\varphi)d\Omega}$$

Relation avec la résistance

En partant de la relation précédente :

$$G(\theta_0,\varphi_0)=4\pi\cdot\frac{F^2(\theta_0,\varphi_0)}{\oiint_\Omega F^2(\theta,\varphi)d\Omega}$$

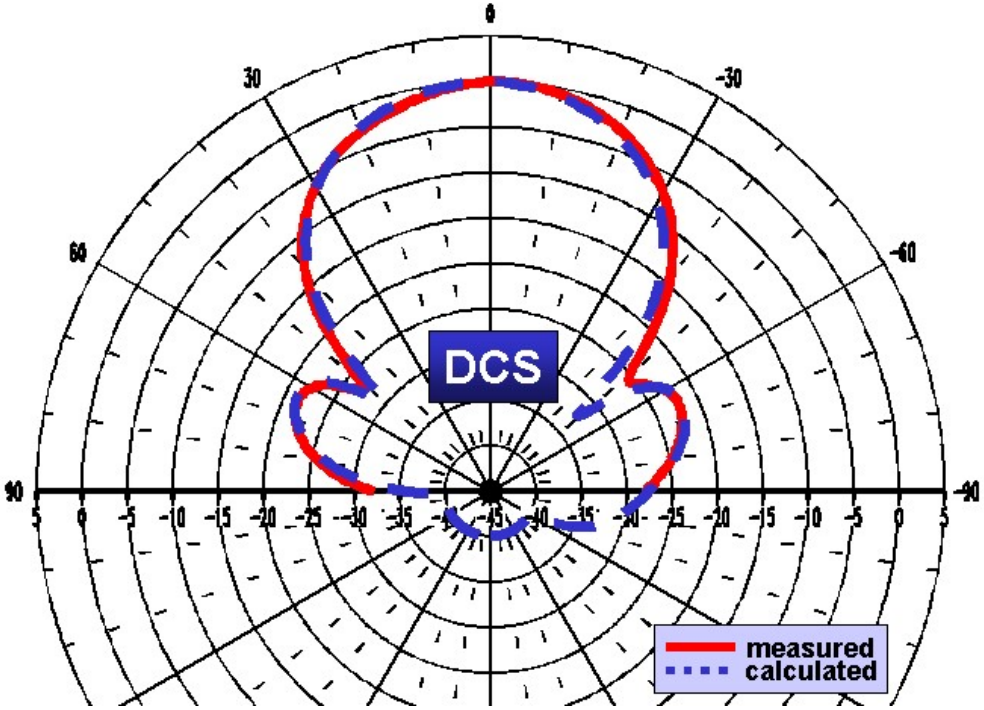
on peut donner une formule simple de calcul du gain en fonction de la résistance de rayonnement :

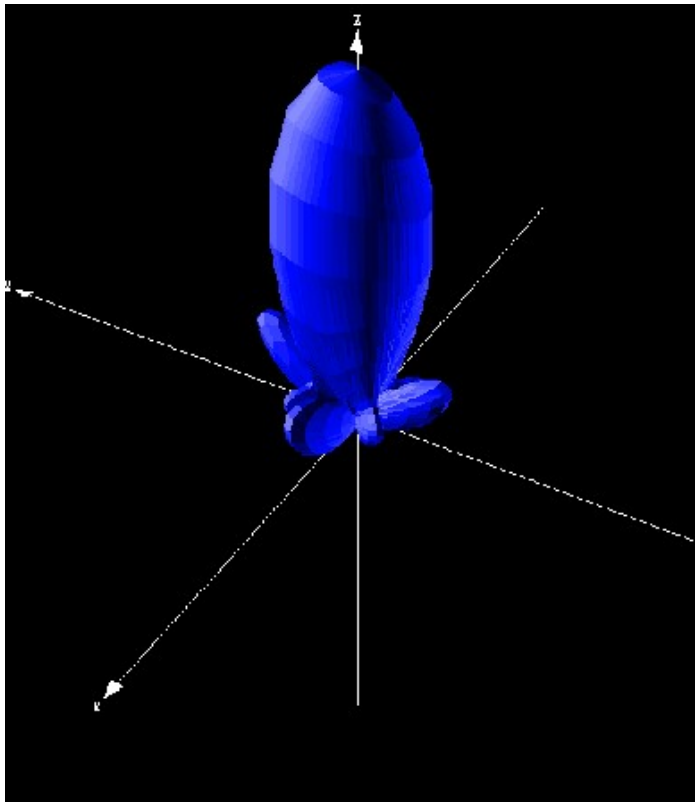
$$\boxed{G=\frac{120F^2(\theta_0,\varphi_0)}{R_r}}$$

toujours dans une hypothèse sans pertes intrinsèques

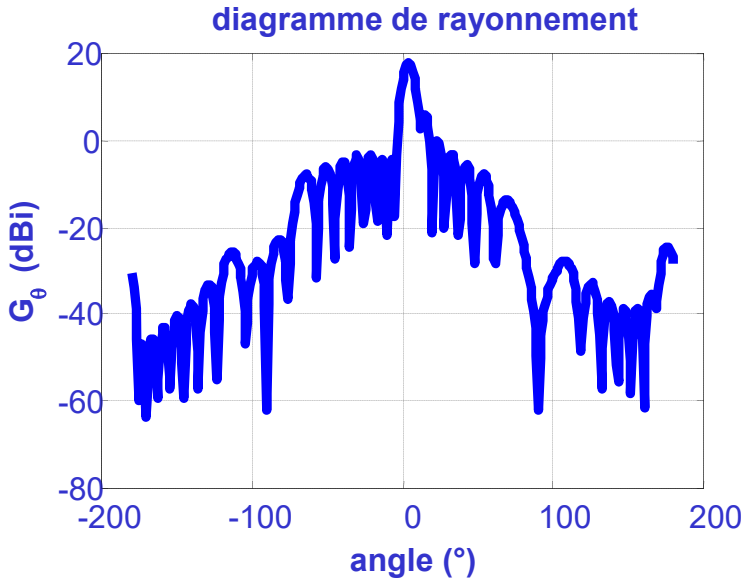
Types de représentation

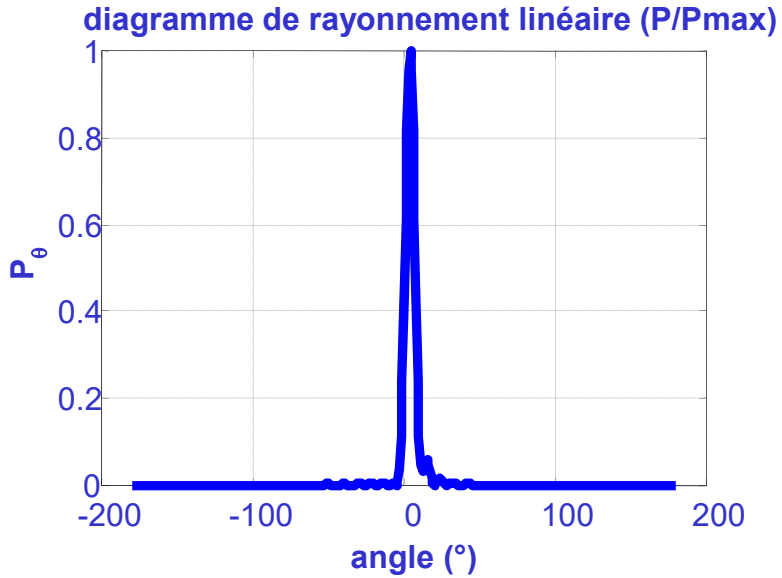
Il existe une multitude de façons de représenter le rayonnement d'une antenne : diagramme en champ, en puissance, gain, directivité, en polaire ou cartésien, en linéaire ou en décibels, en 2D ou 3D

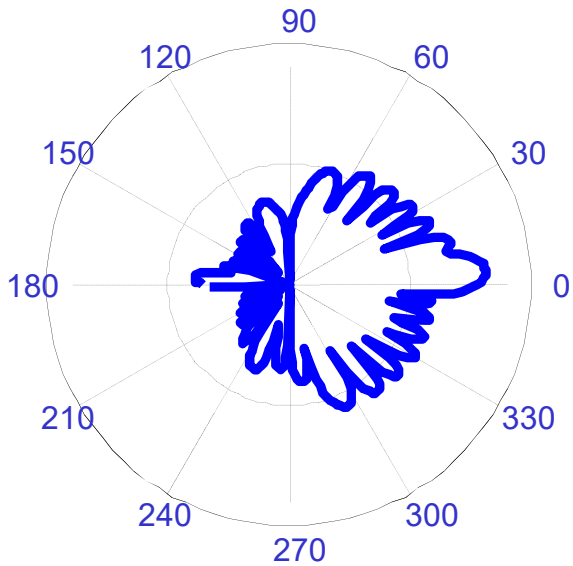


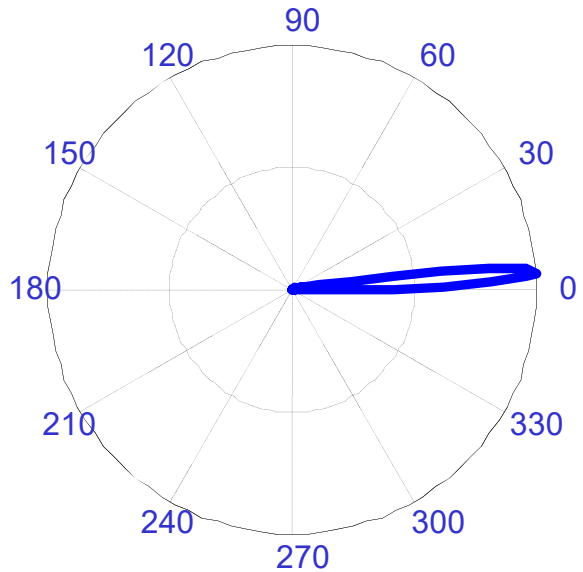


Exemple de pont radio

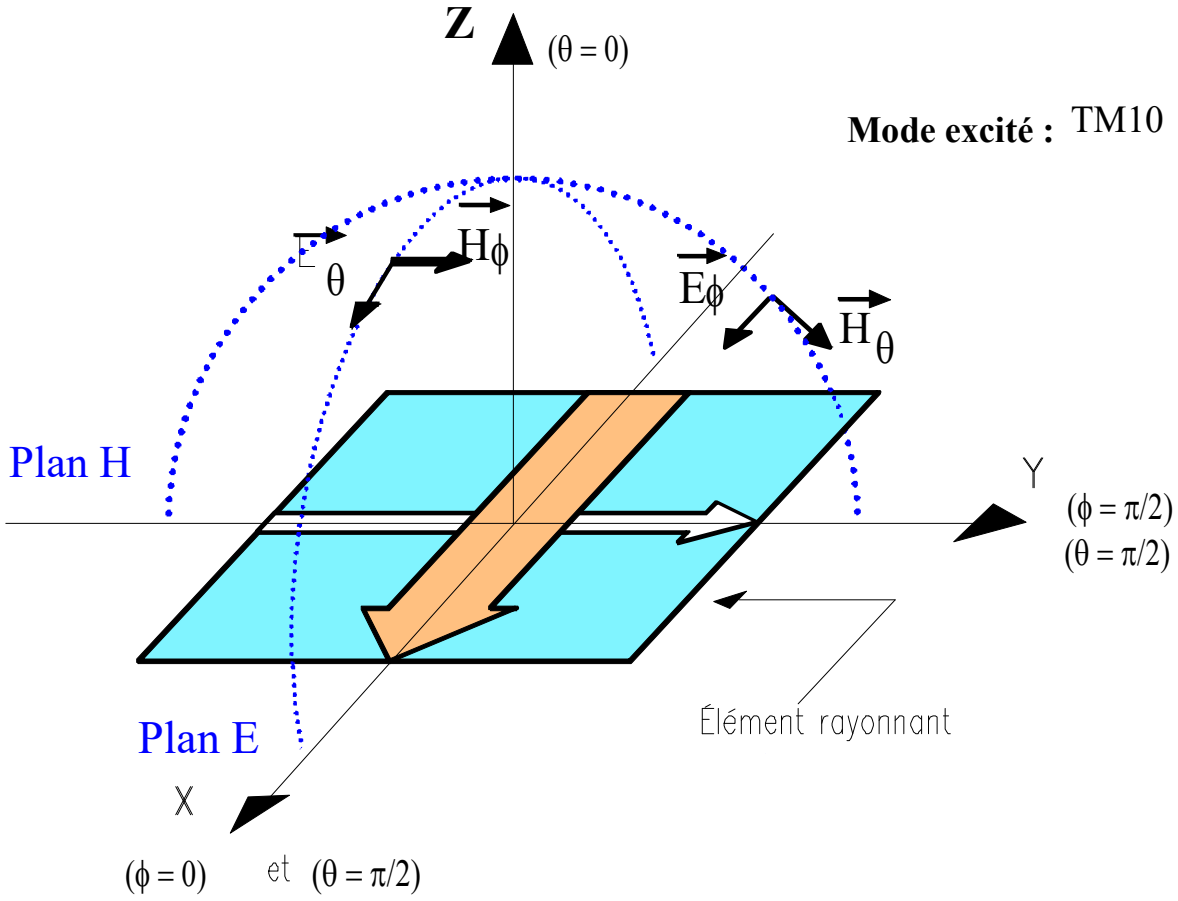








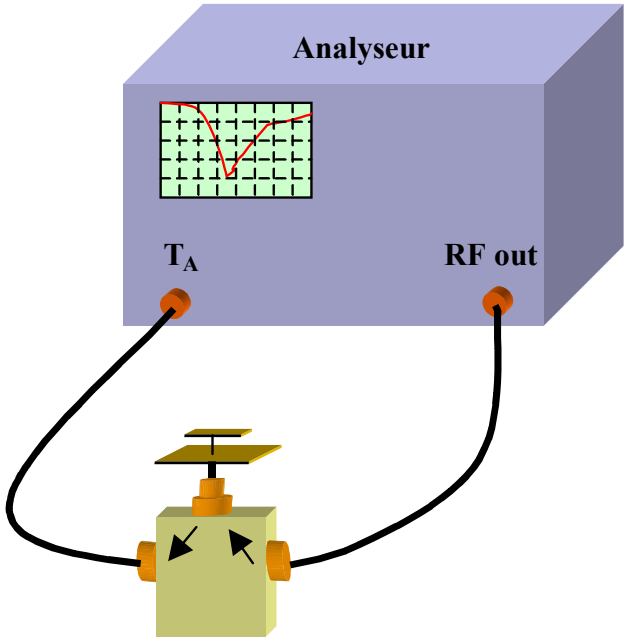
Plans de référence



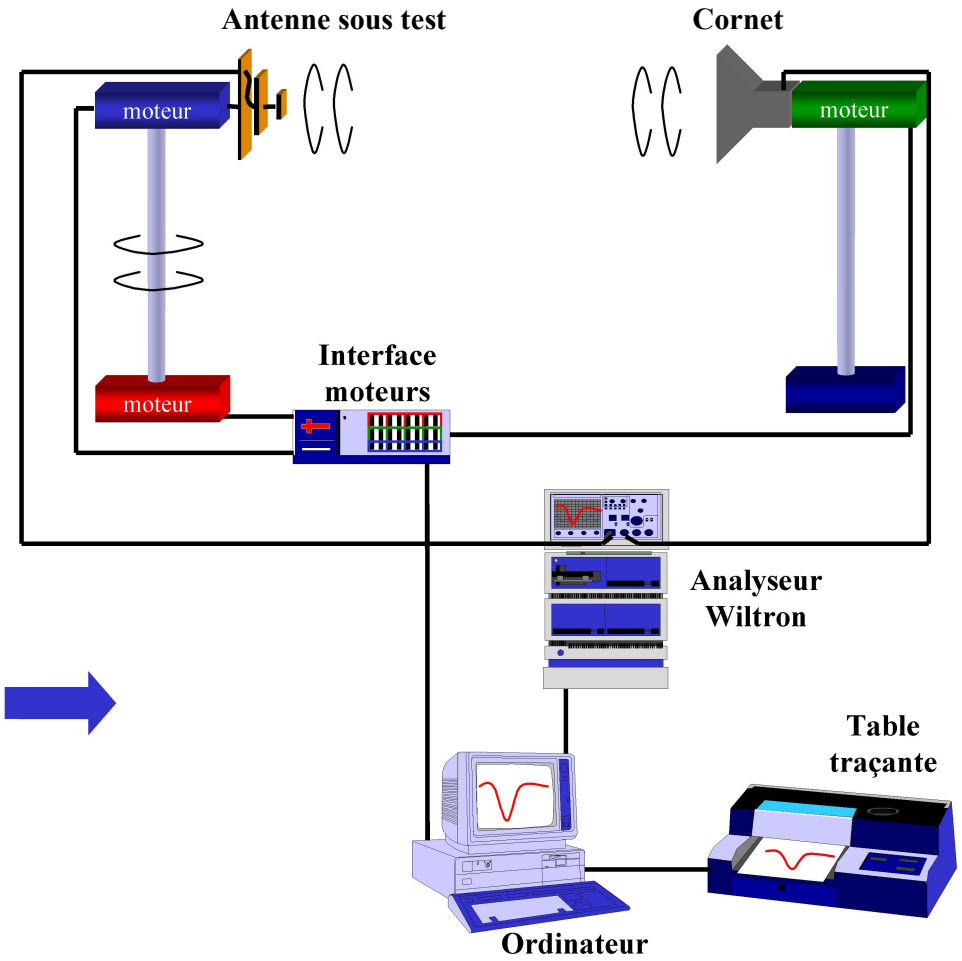
Courants de surface liés à la polarisation croisée: Jy

Courants de surface liés à la polarisation principale:Jx

Méthode de mesure



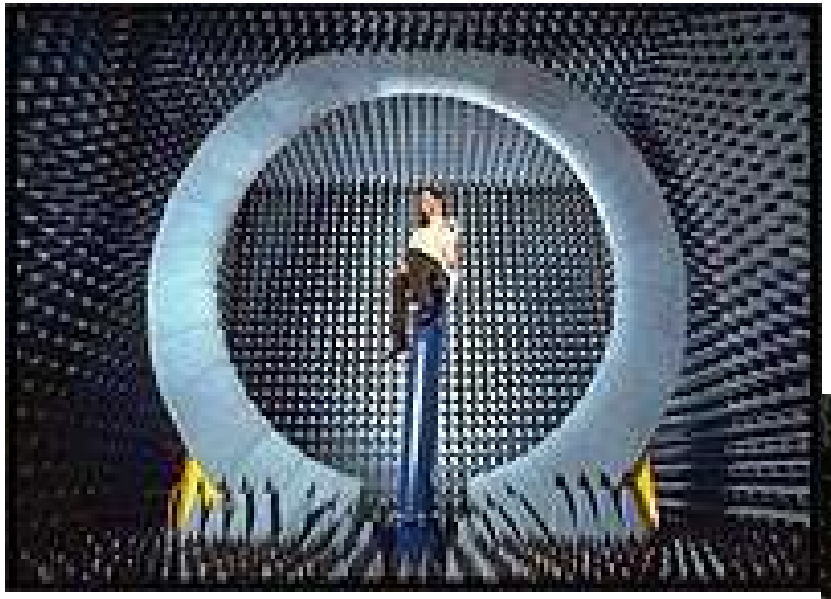
Mesure d'adaptation

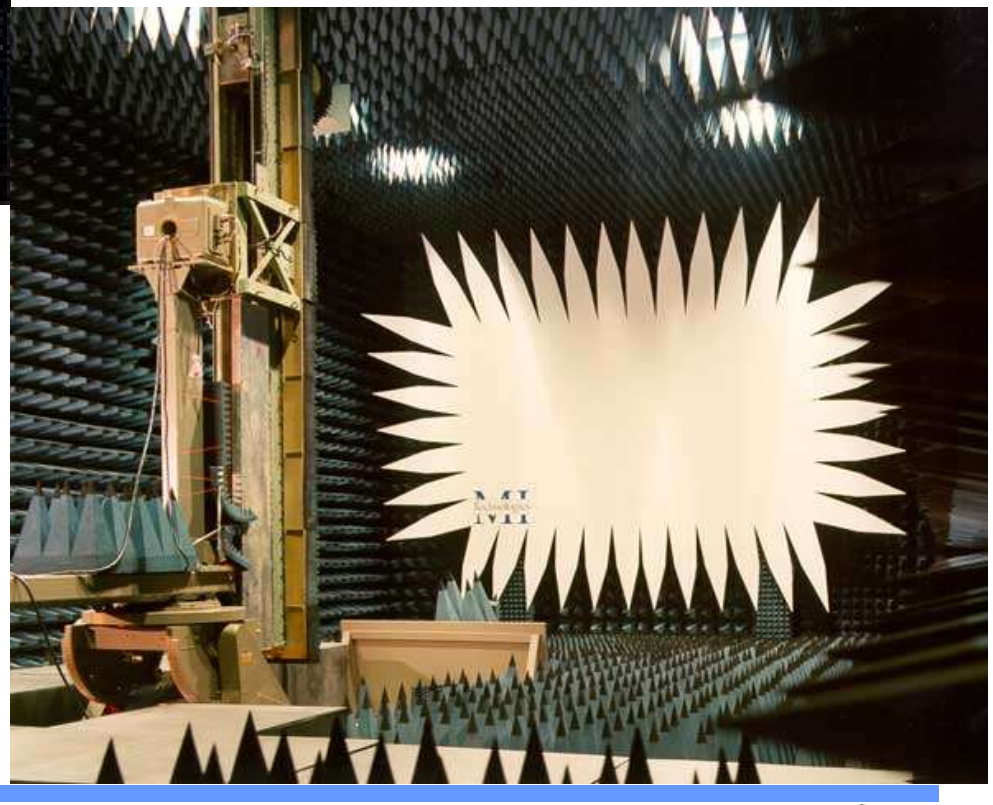


Mesure de rayonnement

Chambres de mesure

Chambres de mesure





PIRE

Lorsqu'une antenne produit une puissance rayonnée Pe, la densité surfacique de puissance créée dans une direction donnée est le produit du gain dans cette direction par la puissance.

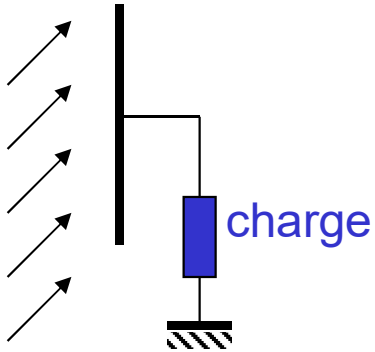
La Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente :

$$PIRE = Pe.Ge$$

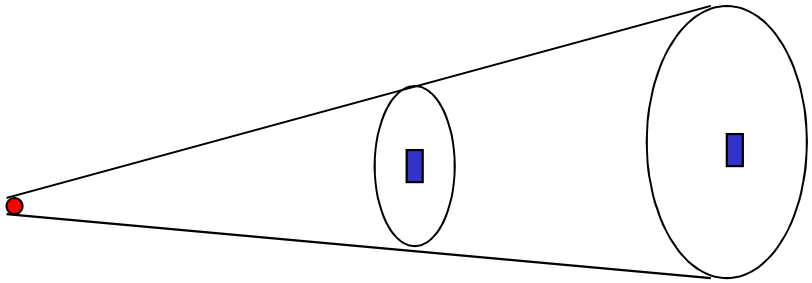
Valeur très utile pour les définitions de normes.

Surface effective

Soit une antenne illuminée par une onde plane de densité surfacique de puissance ΔPs, on appelle surface effective de l'antenne la quantité :



$$S(\theta,\varphi)=\frac{P_d}{\Delta Ps}$$

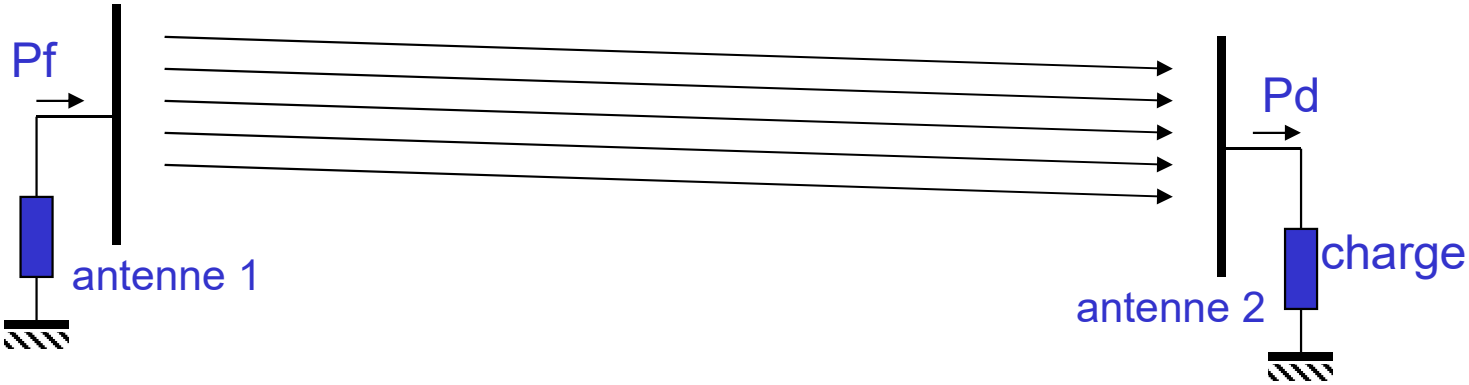


En fonction du gain :

$$G(\theta,\varphi)=\frac{\Delta Ps}{\frac{P_f}{4\pi r}}$$

Surface effective et gain

Si on effectue une transmission entre deux antennes :



Réciprocité : $$\frac{P_d}{P_f} = S_2 \cdot \frac{G_1}{4\pi r^2} = S_1 \cdot \frac{G_2}{4\pi r^2}$$

D'où $$\boxed{\frac{G_1}{S_1} = \frac{G_2}{S_2}}$$

En prenant une transmission avec un doublet élémentaire, on montre que :

$$\boxed{S(\theta,\varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_A(\theta,\varphi)}$$

Bilan de liaison

La formule de FRIIS ou bilan (budget) de liaison permet de calculer la puissance disponible au niveau de la charge en réception en fonction de la puissance fournie à l'antenne d'émission.

On connaît $\frac{P_r}{P_e}=S_2\cdot\frac{G_1}{4\pi r^2}$ or $S_2=\frac{\lambda^2}{4\pi}\cdot G_2$

$$\boxed{P_r=\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_e(\theta,\varphi)\cdot G_r(\theta,\varphi)\cdot P_e}$$

Bilan de liaison complet

La formule précédente suppose des charges adaptées et la même polarisation des antennes. Dans le cas contraire, un budget plus complet peut être effectué :

$$P_d = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \cdot F_A \cdot G_e(\theta,\varphi) \cdot F_B \cdot G_r(\theta,\varphi) \cdot P_f \cdot \eta_p$$

Elle tient compte de l'adaptation des antennes, de leurs gains dans la direction de communication et du rendement de polarisation.

Notations en décibels

Une expression donnée en décibels représente toujours un rapport, donc une valeur relative à une référence.

Comme on traite des valeurs de puissance, on utilise 10log (rapport). Cela reste cohérent avec des calculs en champ où on prend 20log.

Pour les puissances, on parle en dBm ou dBW.

Les directivités ou gains sont exprimées en dB, dBi ou dBd.